

Medição Contínua de Densidade e Concentração em Processos Industriais

Para a medição da densidade em processos industriais muitos métodos são disponíveis, baseados em diferentes tecnologias, tais como: medidores nucleares, refratômetros, medidores mássicos de efeito Coriolis, medição com diapasão vibrante, areômetros, análise de laboratório, etc. Utilizando o princípio do diferencial de pressão hidrostático, com uma sonda de imersão e dois sensores de pressão integrados em uma única unidade, o transmissor de densidade e concentração capacitivo mede de forma contínua e precisa a densidade e a concentração de líquidos

Evaristo Orellana Alves,
Gerente de Produto - Smar

Diversos processos industriais requerem medição contínua da densidade para operarem eficientemente e garantir qualidade e uniformidade ao produto final. Isto inclui usinas de açúcar e etanol, cervejarias, laticínios, indústrias químicas e petroquímicas, de papel e celulose de mineração, entre outras. A densidade é um dos melhores indicadores da composição de um produto, foi usada, por exemplo, por Arquimedes (250 anos A.C.) para determinar que a coroa de ouro do rei Hiero não era pura.

Nos itens a seguir são apresentadas as características do transmissor de densidade capacitivo para a medição contínua

de densidade e concentração de líquidos diretamente nos processos industriais.

No 1º tema é apresentado o transmissor digital de densidade e concentração capacitivo, no item 1 o seu princípio de funcionamento no item 2 as formas de instalação e montagem, no item 3 os detalhes de calibração e partida, no item 4 são apresentados os detalhes de operação e manutenção. No 2º tema é feita a comparação do transmissor de densidade capacitivo com as outras tecnologias disponíveis para a medição de densidade. No 3º tema lista as aplicações mais frequentes deste transmissor. O último assunto mostra a conclusão deste artigo.

 **saiba mais**

PIRES, J. Norberto. **Automação Industrial** - 3ª edição - Editora Lidel

BALCELLS, Josep e ROMERAL, José Luis. **Autómatas programables** - Editora Marcombo

Transmissor Digital de Densidade e Concentração Capacitivo

O transmissor de densidade capacitivo utiliza o princípio de medição de pressão diferencial hidrostática entre dois pontos separados por uma distância fixa e conhecida para calcular com precisão a densidade e concentração de líquidos.

1. Princípio de funcionamento

O equipamento utiliza um sensor de pressão diferencial tipo capacitivo que se comunica mediante capilares com os diafragmas submersos no fluido do processo, separados por uma distancia fixa.

A pressão diferencial sobre o sensor capacitivo será diretamente proporcional à densidade do líquido medido (ver figura e fórmulas). Este valor de pressão diferencial não é afetado pela variação do nível do líquido nem pela pressão interna do vaso.

O transmissor de densidade capacitivo possui ainda um sensor de temperatura localizado entre os sensores de pressão para efetuar a correção e normalização dos cálculos levando em conta a temperatura do processo. Com a temperatura do processo corrige-se a distância entre os diafragmas e a variação volumétrica do fluido de enchimento dos capilares que transmitem a pressão dos sensores à célula capacitiva.

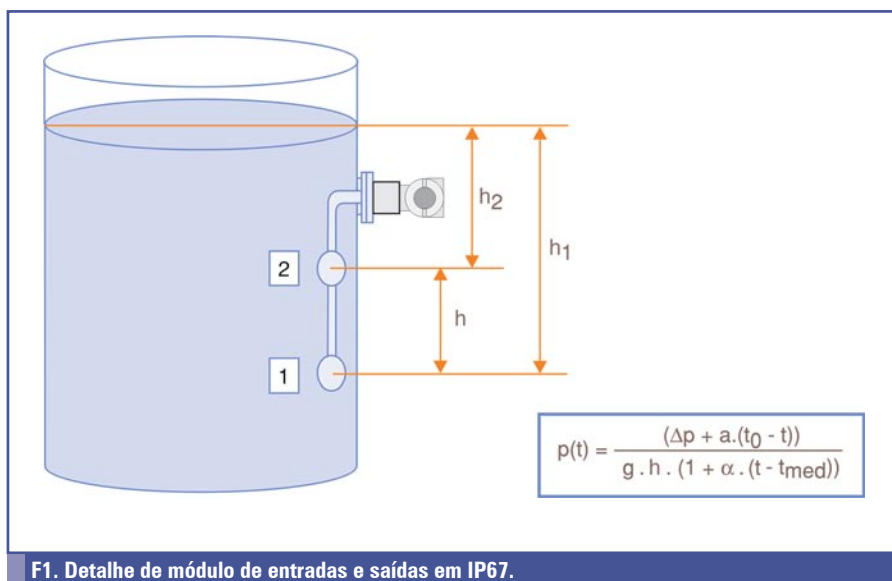
Sendo o sensor de pressão diferencial utilizado do tipo capacitivo ele gera um sinal digital. Como o processamento posterior do sinal se realiza também digitalmente, obtém-se um alto nível de estabilidade e exatidão na medição.

Com a informação gerada pelo sensor de pressão diferencial capacitivo e a temperatura do processo, o software da unidade eletrônica efetua o cálculo da densidade ou da concentração, enviando um sinal de corrente ou digital proporcional à escala de densidade ou concentração selecionada pelo usuário (°Brix, °Plato, °Baumé, g/cm³, etc.).

A mesma informação poderá ser acessada no indicador digital local ou de forma remota através de comunicação digital.

O transmissor inteligente de densidade capacitivo, oferece uma exatidão de $\pm 0,0004$ g/cm³ ($\pm 0,1$ °Brix), e pode ser utilizado em medição de densidade desde 0,5 g/cm³ até 5 g/cm³.

Este método de medição é imune a variações de nível do vaso e pode ser empregado



F1. Detalhe de módulo de entradas e saídas em IP67.

tanto em tanques abertos quanto em tanques pressurizados. A única obrigatoriedade é que ambos os sensores de pressão devem estar em contato permanente com o fluido que se está medindo.

Outra importante vantagem deste transmissor é sua robustez, pois não possui partes móveis e não é afetado por vibrações da planta, diferentemente dos medidores de densidade baseados na oscilação de um elemento sensor.

1a. Medição de densidade

O transmissor de densidade capacitivo mede a densidade de líquidos da seguinte forma, observe a **figura 1**.

Pressão hidrostática aplicada no transmissor de densidade capacitivo:

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot h_1$$

$$P_2 = \rho \cdot g \cdot h_2$$

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2)$$

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot h$$

$$\rho = \Delta p / g \cdot h$$

No cálculo da densidade temos a fórmula dada na **figura 1**, onde:
 ρ Densidade

t : Temperatura do processo

Δp : Diferencial de pressão

a : Coef. compensação de temperatura do fluido de enchimento

t_{zero} : Temperatura de calibração do Transmissor

g : Aceleração da gravidade local

h : Distância entre os diafragmas

α : Coeficiente de dilatação do metal

t_{med} : Temperatura de medição de h

1b. Medição de concentração

Concentração é a quantidade de um elemento em uma solução e, portanto, esta medida não é dependente da temperatura, diferentemente da densidade.

Se tivermos uma solução com 25% de açúcar a 20°C, esta solução terá uma densidade ρ , quando aquecemos esta solução a 60°C continuaremos tendo a mesma concentração de 25% de açúcar na solução, mas a densidade da solução será ρ' , tal que $\rho' < \rho$, pois sempre que aumentamos a temperatura de um líquido diminuimos sua densidade.

Desta forma alguns processos industriais utilizam a concentração como unidade de medição e para controle do processo. As unidades de concentração mais usadas são:

- **Grau Brix e Grau Plato:** é a porcentagem em massa de sacarose presente em uma solução. Por exemplo: em uma solução a 30°Brix teremos 30g de sacarose em 100g de solução. Utilização: indústrias de açúcar e álcool, indústrias de sucos, refrigerantes, cervejaria, etc.
- **Grau Baumé:** há duas fórmulas distintas para o cálculo do Grau Baumé, uma para líquidos mais leves que a água e outra para líquidos mais pesados: °Bé (leve) = 140 / DR @ 60°F – 130; °Bé (pesado) = 145 – 145 / DR @ 60°F. Utilização: indústrias químicas, petroquímicas, papel e celulose, etc.
- **Grau INPM:** é a porcentagem em peso de álcool em uma solução hidroalcoólica. Por exemplo: uma

solução hidroalcoólica a 97°INPM contém 97g de álcool em 100g de solução. Utilização: destilarias de álcool, etc.

- **Grau GL (Gay Lussac):** é a porcentagem em volume de álcool em uma solução hidroalcoólica. Por exemplo: uma solução hidroalcoólica a 97°GL contém 97 ml de álcool em 100 ml de solução. Utilização: indústrias de bebidas, etc.
- **Grau API:** é calculado pela expressão: $^{\circ}\text{API} = 141,5 / \text{DR} @ 60^{\circ}\text{F} - 131,5$. Utilização: indústria do petróleo.
- **% de Sólidos:** pode-se calcular a porcentagem de sólidos de um fluido utilizando-se a seguinte equação: $\% \text{Sol.} = a_0 + a_1.Bé + a_2.Bé^2 + a_3.Bé^3 + a_4.Bé^4 + a_5.Bé^5$. Faz-se uma tabela relacionando a concentração em Grau Baumé do fluido de processo com a % de sólidos obtida no laboratório e encontra-se a melhor equação que relacione estas variáveis. Após configurarem-se os coeficientes a_0, a_1, \dots, a_5 , o transmissor de densidade capacitivo estará apto a informar a % de sólidos do fluido de processo.

Caso tenha-se um processo no qual mais do que um elemento dissolvido varie sua quantidade, a densidade da solução poderá não ser proporcional à variação da concentração de um destes elementos, desta forma o transmissor de densidade não será adequado para se obter sua concentração.

2. Instalação e montagem

Sendo o transmissor de densidade capacitivo uma unidade única e integrada, sua instalação torna-se muito simples, necessitando de apenas uma penetração no recipiente, esta característica o diferencia de outros sistemas de medição.

Esta linha de transmissores de densidade inclui um modelo industrial com montagem flangeada (**figura 2a**) e um modelo sanitário com conexão ao processo usando braçadeira tipo tri-clamp (**figura 2b**).

No modelo sanitário, a sonda que fica imersa no fluido de processo têm acabamento superficial polido, de acordo com a norma 3A para evitar depósito de produto e crescimento de bactérias.

Ambos os modelos, podem ser montados de forma lateral (em tanques) ou de topo (em vasos amostradores). Como o

indicador digital pode ser rotacionado a leitura será cômoda em qualquer posição de montagem.

O transmissor de densidade capacitivo pode ser montado sem a interrupção do processo, quando instalado em um *by-pass* através de um vaso amostrador e devido ao seu princípio de funcionamento não requer nenhum tipo de calibração especial em laboratório para começar a funcionar, basta energizá-lo para que ele comece a medir imediatamente, pois ele deixa a fábrica já calibrado na unidade e no range de medição selecionados pelo usuário.

2a. Montagem em tanques

Em geral, o modelo mais adequado para montagem em tanques é o tipo curvo. Este modelo é montado na parede do tanque, com uma conexão flangeada ou *tri-clamp*.

Quando não é possível instalar-se o transmissor diretamente no tanque, pode-se utilizar um vaso amostrador externo tipo *stand-pipe* (ver **figura 3**).

2b. Montagem em linha

Nos processos em que não se disponha de recipientes ou tanques de armazenamento para fazer a medição é possível instalar-se o transmissor de densidade capacitivo em linha. Para tanto é só intercalar na linha um vaso amostrador por onde circule o fluido de processo, tal como se vê nos exemplos (**figuras 4a e 4b**).

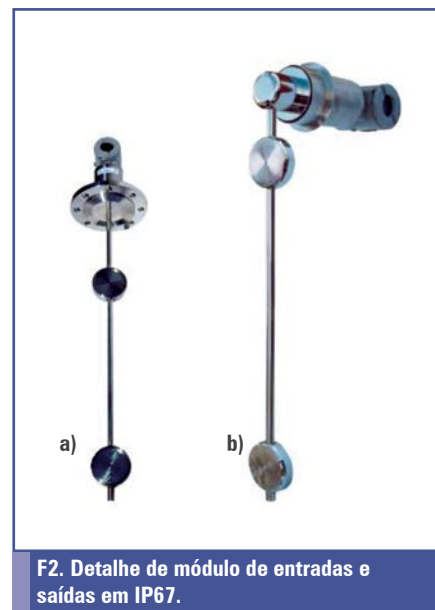
Como a entrada do produto no vaso amostrador se dá simultaneamente pela parte superior e inferior, a medição não é afetada pela velocidade de circulação do fluido.

Outra alternativa de montagem é o uso de vaso amostrador com descarga por transbordamento, nesta configuração o produto entra pela parte inferior e transborda na parte superior (**figuras 4c**).

Desta forma, se dimensiona o recipiente para que a altura da coluna de líquido constante, que transborda, cubra completamente os sensores de pressão do transmissor.

3. Calibração e partida

O transmissor de densidade capacitivo é calibrado em fábrica na unidade de engenharia e no range de medição designados pelo usuário, desta maneira basta instalar o equipamento e energizá-lo que ele já começa a medir. Em caso de recalibração ou



F2. Detalhe de módulo de entradas e saídas em IP67.

reprogramação do range de trabalho é só conectar ao transmissor um programador de campo (*hand-held*) e fazer a operação, sem precisar interromper o processo. Como os cálculos de densidade e normalização por temperatura se realizam na mesma unidade, não são necessários outros dados além do range de densidade ou concentração que se vai trabalhar.

Uma característica fundamental deste transmissor é que dispensa calibração em laboratório.

A alimentação se realiza pelo mesmo par de fios de comunicação de 4-20mA e para a verificação do laço durante a partida, o transmissor pode gerar uma saída de corrente constante definida pelo usuário.

Caso o usuário necessite que o valor de densidade ou concentração seja expresso em uma unidade diferente das normalmente usadas, por exemplo, % de sólidos, duas opções são disponíveis:

- Um polinômio do 5º grau com os coeficientes configuráveis para realizar a correlação entre a função da unidade do usuário e a densidade;
- Uma tabela de 16 pontos com duas entradas para realizar uma linearização da função que relaciona a unidade do usuário com a densidade.

Habilitando uma destas duas opções, o transmissor de densidade e concentração medirá primariamente a densidade, enquanto que a indicação local e a saída digital seguirão a função carregada no polinômio ou na tabela.

4. Operação e manutenção

O transmissor de densidade capacitivo oferece uma indicação direta e em unidades de engenharia do valor da densidade do líquido, assim como de sua temperatura, tanto no indicador local como através da comunicação digital.

Este transmissor foi projetado para poder trabalhar com fluidos sujos e sólidos em suspensão, sem precisar de filtragem. O desenho dos sensores de pressão faz com que seja muito pouco frequente o depósito de produto sobre eles, desta forma não é necessária limpeza periódica do equipamento.

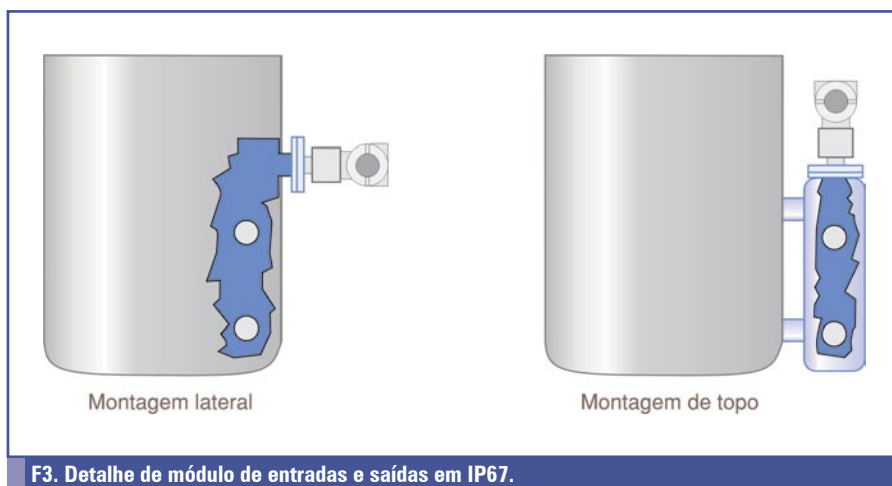
O modelo sanitário foi projetado especialmente para trabalhar com sistemas de limpeza CIP, assegurando que todas as partes do transmissor que tenham contato com o processo sejam alcançadas pelo fluido de lavagem do sistema CIP.

O Transmissor Digital de Densidade e Concentração Capacitivo comparado a Outras Tecnologias

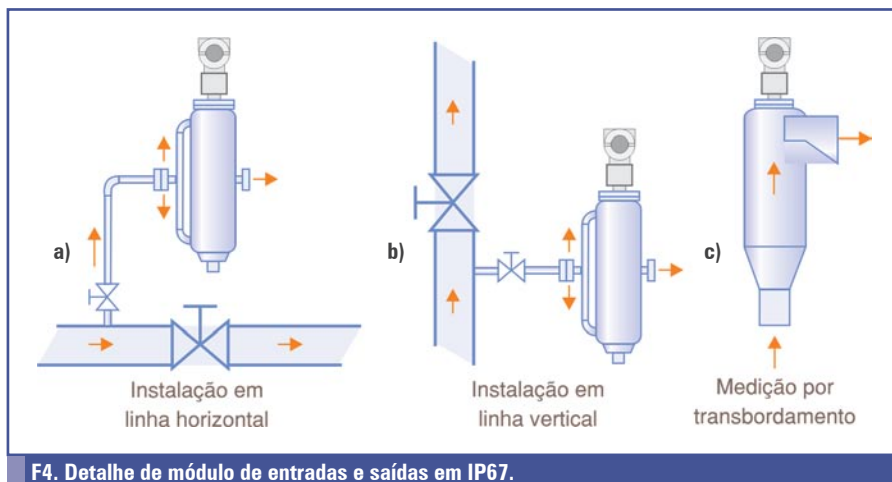
1. Transmissor de Densidade Capacitivo

O Transmissor Digital de Densidade e Concentração Capacitivo oferece uma exatidão de $\pm 0.0004 \text{ g/cm}^3$, permitindo que o usuário produza um produto com qualidade mais uniforme, além de em muitos casos proporcionar economia de aditivos e energia. O transmissor de densidade capacitivo é uma unidade única e integrada, portanto requer uma única perfuração no tanque, e não tem partes móveis, além disto, os cálculos de densidade e compensação de temperatura são feitos na própria unidade eletrônica não necessitando de hardware adicional e as indicações estão disponíveis em campo.

Podem ser instalados em tanques ou em linha com a utilização de um vaso amostrador. Como este transmissor tem uma sonda em contato permanente com o fluido de processo, devem ser tomados cuidados especiais quando instalado em fluidos incrustantes. Neste caso deve-se prever um sistema de limpeza para ser acionado especialmente quando haja uma parada no processo. Para fluidos corrosivos deve-se selecionar um material adequado para a sonda do equipamento.



F3. Detalhe de módulo de entradas e saídas em IP67.



F4. Detalhe de módulo de entradas e saídas em IP67.

2. Transmissor Radioativo

O transmissor de densidade nuclear utiliza uma fonte radioativa, normalmente o Césio 137, para inferir a densidade do fluido. Este equipamento é composto de duas partes, que são instaladas a 180° na tubulação de processo, uma fonte e um receptor. A fonte nuclear emite feixes de raios gama que atravessam a parede do tubo e o fluido de processo. Estes raios gama são absorvidos pelo receptor do transmissor. A densidade do fluido é inversamente proporcional à radiação recebida pelo receptor. A radiação detectada é convertida em pulsos proporcionais de luz, os quais são convertidos em sinais elétricos (4–20 mA), ou outros sinais usuais de processo.

Este método requer, desde o momento da instalação, licença especial governamental devido ao uso de fontes radioativas. Além do mais deve-se verificar periodicamente se não existe vazamento de radiação na instalação. A instalação compreende a fonte, o detector, a unidade eletrônica e o cabeamento entre os mesmos. Como a fonte de radiação requer

uma alimentação de potência, não pode ser alimentado por um par de cabos.

Este sistema só pode ser utilizado em líquidos em movimento, portanto não pode ser instalado em tanques.

O transmissor de densidade nuclear não tem contato com o fluido de processo sendo desta forma imune a corrosão, abrasão ou incrustação.

3. Transmissor de Diapasão Vibrante

Este método de medição de densidade utiliza um diapasão ou garfo vibrante. A frequência de ressonância deste diapasão depende da densidade do fluido no qual ele está submerso. O diapasão é excitado por um excitador piezoeletrônico e sua ressonância é detectada por um coletor piezoeletrônico.

Devido ao consumo elevado, os transmissores de diapasão vibrante requerem alimentação separada do laço de 4–20 mA. Este tipo de transmissor é indicado para ser empregado em fluidos limpos, não corro-

sivos e não incrustantes, pois o diapasão vibrante está em contato permanente com o fluido de processo.

4. Transmissor Mássico de Efeito Coriolis

Os medidores de vazão mássica baseados no efeito Coriolis medem a densidade do fluido como um dos parâmetros para o cálculo da vazão mássica.

Estes medidores utilizam pares de tubos, normalmente em formato de “U”, por onde circula o fluido de processo. Estes tubos são excitados magneticamente para uma frequência de vibração. Quando vazios, estes tubos têm uma determinada frequência de vibração que é alterada quando há a circulação de fluido por eles. A relação entre a frequência de vibração dos tubos com e sem fluido é proporcional à densidade.

Os transmissores de vazão mássica tipo Coriolis são instalados em linha na tubulação e conseqüentemente inadequados para medidas em tanques. São adequados somente para fluidos limpos e sem sólidos em suspensão, pois os tubos têm pequenos diâmetros e podem entupir. Outra dificuldade é a intercambiabilidade, porque não há nenhuma norma para regulamentar as dimensões entre flanges.

Para processos que se necessite da vazão mássica pode-se obter também a densidade utilizando-se um medidor mássico de efeito Coriolis.

5. Densidade Inferida

Este método utiliza um transmissor de pressão diferencial com dois selos remotos, ou então dois transmissores de pressão. Desta forma mede-se a pressão em dois pontos, com o que se pode inferir a densidade. Normalmente se faz necessário uma medição adicional de temperatura para se efetuar os cálculos de compensação. A instalação requer a montagem dos três transmissores e em alguns casos de computadores de campo, onde se realizam os cálculos. Em geral, o cálculo de densidade se obtém em um sistema central e, portanto, não está disponível em campo.

6. Refratômetro

Este método de medição de densidade baseia-se na refração da luz. O transmissor é composto por prisma óptico, fonte de luz e sensor. A fonte de luz, normalmente

infravermelho, envia um feixe de luz contra a interface entre um prisma e o fluido de processo, com diferentes ângulos. Alguns raios são totalmente refletidos, outros parcialmente refletidos e outros sofrem refração na solução dependendo do ângulo. O ângulo crítico medido é uma função da densidade do fluido. Fotocélulas convertem a imagem óptica em sinal elétrico.

Os refratômetros não são sistemas a 2 fios e portanto requerem alimentação externa, a unidade eletrônica é separada e interconectada ao sensor através de um cabo.

O refratômetro requer que o prisma que faz a refração da luz esteja sempre limpo, portanto cuidados especiais devem ser tomados na instalação para não ocorrer o acúmulo de resíduos. Este tipo de medidor só pode ser aplicado em fluidos em movimento, portanto são inadequados para instalação direta em tanques.

7. Areômetros

Os areômetros não fornecem medição contínua, são utilizados para medições periódicas, tomando-se amostras do fluido de processo. Algumas aplicações requerem precauções especiais, pois podem expor os operários a substâncias tóxicas ou corrosivas no momento de se coletar amostra ou em seu manejo posterior.

A exatidão da medição que se pode obter com estes medidores é em geral muito baixa.

8. Análise de laboratório

Da mesma forma que na medição com areômetros, na medição por análise em laboratório deve-se coletar uma amostra do fluido de processo e analisá-lo no laboratório.

Apesar da exatidão conseguida na medição da densidade ou concentração em laboratório ser em geral muito boa, em muitos casos os valores obtidos não corresponde à realidade, pois as condições ambientais do processo não podem ser reproduzidas em laboratório, o que pode ocasionar erros na análise.

Em processos que variam rapidamente (por exemplo, em alguns processos de fermentação), o tempo de demora na análise pode levar a tomar decisões errôneas porque o valor conseguido na análise carece de validade.

Aplicações

A versatilidade do transmissor de densidade capacitivo permite ao usuário utilizar a unidade de medição mais indicada de acordo com o processo. A indicação deste transmissor pode ser expressa em unidades de densidade tais como: g/cm³, kg/m³, lb/ft³, densidade relativa (@20°C, @4°C) ou concentração (°Brix, °Baumé, °Plato, °INPM, °GL, % de sólidos, % de concentração).

A troca de uma unidade de medição por outra não implica na necessidade de re-calibração do transmissor.

Algumas aplicações frequentes são:

Usinas de açúcar e álcool:

- Grau Brix no mosto e no mel,
- Grau Brix no xarope dos evaporadores,
- Grau INPM na saída das colunas de destilação,
- Grau Baumé do leite de cal,
- Densidade do lodo no decantador,
- Nível de interface álcool/ciclohexano.

Indústrias alimentícias:

- Concentrados de frutas,
- Cremes e leite condensado,
- Concentração de mistura em óleos vegetais.
- Diluição de amido,
- Méis, geléias, etc.

Indústrias de bebidas:

- Grau Plato em fermentadores de cerveja,
- Grau Plato em cozedores de cerveja,
- Grau alcoólico (INPM ou GL),
- Grau Brix em diluições de xaropes,
- Concentração de sucos,
- Densidade de derivados de leite,
- Grau Brix do café solúvel.

Indústrias químicas e petroquímicas:

- Densidade e concentração de ácidos,
- Densidade de soda cáustica,
- Densidade de cloreto de sódio,
- Densidade de leite de cal,
- Densidade de gasolina, querosene, óleo diesel, GLP,
- Nível de interface água/óleo.

Indústrias de celulose e papel:

- Concentração de hidróxido de potássio,
- Concentração de licores (licor negro, licor verde, etc.),
- Densidade de lama de cal,
- Concentração de soda cáustica,
- Diluição de amido,
- Diluição de celulose.

Mineração:

- Densidade da polpa de minério,
- Densidade da polpa na saída do espessador,
- Densidade na entrada e saída da célula de flotação,
- Densidade na saída das espirais de concentração,
- Densidade da extração de lama,
- Diluição de ácidos,
- Densidade da lama de cal.

Conclusão

Utilizando-se um transmissor de densidade para medir-se de forma contínua a densidade ou a concentração de processos industriais podem-se obter muitos benefícios, tais como: automatizar o processo diminuindo sua variabilidade, aumentar a produtividade, otimizar o processo reduzindo em alguns casos o uso de reagentes e de energia, eliminar ou diminuir drasticamente o custo de mão-de-obra relacionada a tomadas de amostras e análises de laboratório, eliminar perdas e leituras erradas relacionadas a tomadas de amostras, prover dados em tempo real para o sistema de gerenciamento e controle de processo, disponibilização máxima de dados para o controle estatístico do processo (melhora do controle de qualidade), aumento da confiabilidade do processo garantindo maior uniformidade e qualidade do produto final.

MA**2/3**